

論文審査の結果の要旨

氏名 黒田 康 浩

雷雲あるいは雷にともなって検出される放射線は、これまでに世界各地で報告されているが、高エネルギー放射線の発生機構、および宇宙線や発雷との関連などは、観測的にも理論的にも解明には程遠い。本論文は、日本海沿岸の冬季雷雲に伴って観測された高エネルギーガンマ線のバーストを報告し、その特徴の解析から雷雲中の高電場による高エネルギー粒子発生機構の研究を行ったものである。

本論文は全 6 章からなる。第 1 章では、雷あるいは雷雲にともなう放射線の観測例、また雷雲中に生じる高電場における相対論的電子の加速（逃走電子の発生）と雪崩的増殖の理論 RREA(Relativistic Runaway Electron Avalanche)について概説する。第 2 章は、本論文と関係の深い最近の観測である北陸の冬季雷雲からのガンマ線の観測、アルメニアのアラガツ山における雷に付随した中性子線の観測についてまとめる。本論文の雷雲からのガンマ線観測は、原子炉から発生する反電子ニュートリノの検出を目的とした PANDA 検出器の試作機によって行われた。第 3 章は、PANDA の粒子検出原理と設計、また黒田康浩氏が行ったガンマ線のエネルギーおよび入射位置の較正作業と性能評価について記述している。

雷雲に伴うガンマ線のバースト現象は、黒田氏らが反電子ニュートリノの検出試験のために大飯発電所に持ち込んだ PANDA36 試作機で偶然に記録された。2011 年 11 月 18 日から 2012 年 1 月 18 日までの試験期間中に 3 例のバーストが記録され、バーストの継続時間は 60-180 秒、検出された最大エネルギーは 20MeV に近く、3MeV 以上の最大計数率は毎秒 230-550 カウントであった。第 4 章ではこの発見の経緯をのべ、観測された 3 例のバーストについて、とくに雷の電波観測データベースによる時間・空間的な一致から、このバーストが雷雲から生じたものと確認している。黒田氏は GEANT4 を用いた詳細なシミュレーションを行い、観測された 3 例のエネルギースペクトルが PANDA36 上空の比較的低い場所（高さ 100-900m）で垂直下方に放射された単色に近い電子線（14-20MeV 程度）の、大気中での制動放射によって説明できることを示した。また到来方向の解析によれば、ガンマ線は PANDA36 検出器の上方から入射したもので、バースト時間中にこの方向が変化している兆候はなかった。北陸の冬季雷雲からのガンマ線放射は、これまでに幾つかの観測例があるが、PANDA36 は検出感度がたかく、セグメント化された検出器により事象ごとのガンマ線到来方向情報を取得できることが特徴である。本論文では、高統計のデータを解析することで上空の発生源電子線のエネルギースペクトルや到来方向の時間変動の情報が得られた。また 150 マイクロ秒以内の遅延相関により、中性子の到来と矛盾しない信号がバースト中の 1 例に毎秒 14 ± 5

カウントで記録された。

第 5 章では、前章で得られた電子線発生 の推定高度とエネルギー分布を用いて、発生源電子線の流量の推定を行い、 $8.8 \times 10^4 - 2.0 \times 10^5 / (\text{秒 m}^2)$ が得られた。RREA による電子数の増殖係数としては、3 例に対してそれぞれ 750, 800, 350 となった。増殖係数の決定については 1 桁程度の不定性があると評価されているが、これは上空電子線の流量推定が不定性の大きい発生高度に依存し、また RREA の種粒子と仮定される宇宙線 2 次電子流量に詳細な測定データが無いためである。第 6 章では観測結果をまとめ、検出されたガンマ線のバーストが、雷雲中の RREA 過程に由来するとして矛盾のないことを結論している。

本論文は、冬季の日本海沿岸に発生する特徴的な雷雲に伴う高エネルギーガンマ線のバーストを観測し、その発生のもととなる RREA 過程の検証を行ったものであり、十分な学術的価値を持つ。宇宙線による RREA 過程は、発雷のトリガーとしての可能性も注目されており、本論文の研究は今後おおいに発展する可能性がある。本論文は伊藤主税、井上慶純、小栗秀悟、加藤陽、中田量子、蓑輪眞の 6 氏との共同研究であるが、本観測における黒田康浩氏の貢献は、検出器の製作や較正からデータ解析にいたる全般で顕著である。

以上をもって、黒田康浩氏に博士（理学）の学位を授与できると審査委員の全員一致で認める。